

PENGARUH RASIO BEBAN (R) PADA BEBAN BERULANG (DAERAH-B) TERHADAP LEBAR RETAK PELAT BETON BERTULANG SATU ARAH

Agoes Soehardjono MD¹⁾, IGP Raka²⁾, Priyo Suprobo³⁾

ABSTRACT

The problems of crack width are something that still need to be investigated more deeply. The existing formula still show large scatter and effects of repeated loadings on crack width still less satisfied. Such formula have been expressed by some international codes such as Eurocode 2 and ACI 318-02 (2002).

Analysis on the effects of load ratio (R) under repeated loadings in region - B on crack width of one-way RC slabs needs to be done. Analysis of crack width is done by fracture mechanic approach which looks over the effects of variation of steel stress (fs) and load ratio (R). Initial relative crack depth (ξ_i) and crack growth rate ($\xi_i = f(fs, R)$) analysis on unidirectional composite materials will be discussed in determining crack width of the load cycle (N). The crack width calculation is a development of experimental result (A. Carpinteri, 1992).

A study on parameter is done on the RC slabs which calculate stress intensity factor K_{IC} due to axial / moment load combination, and the result shows that steel stress and load ratio parameter are an important parameter. In fact on the load cycle N of 10^6 and steel stress ratio f_s/f_y of 0,6, the effects of load ratio R of 0,5 is significant against relative crack depth ($\xi = a/h$) than that the maximum crack width (w_{maks}).

Key words : crack width, steel stress, crack growth rate, load ratio.

PENDAHULUAN

Retak adalah indikator kelayakan pada struktur pelat lantai jembatan jalan raya yang merupakan salah satu prasarana transportasi. Masalah lebar retak pada pelat beton bertulang cukup kompleks (dapat menimbulkan korosi pada tulangan baja yang berakibat struktur mengalami keruntuhan), karena itu sejumlah pendekatan teoritis, semi teoritis, dan empiris telah dikembangkan oleh beberapa ahli.

Pengaruh beban berulang pada selang beban kerja sangat penting untuk beberapa struktur terutama bila berada pada lingkungan yang korosif. Beban berulang mengakibatkan kekuatan lekat berkurang sehingga lebar retaknya akan semakin bertambah. Hasil kerja dari ACI Committee 224, 1980 melaporkan bahwa penambahan lebar retak akibat beban jangka panjang atau beban berulang setelah beberapa tahun dapat bervariasi dari (10 – 1000) %.

Pengaruh rasio beban ($R = \sigma_{min} / \sigma_{maks}$) pada beban berulang (repeated loadings) terhadap lebar retak pelat beton satu arah dipandang cukup signifikan, sehingga studi parameter R pada daerah B perlu dilakukan agar rumusan lebar retak lebih memuaskan dan dapat diterapkan di lapangan.

MEKANIKA RETAKAN PADA STRUKTUR BETON

Untuk dapat menganalisis perilaku retak elemen struktur perlu mengetahui hubungan antara beban dan deformasi. Bila elemen retak dibebani aksial (F) dan

momen (M) secara simultan pada kondisi elastis akan terjadi tambahan deformasi.

Deformasi sudut ($\Delta\phi_{MP}$) akibat F, bersama dengan COD (crack opening displacement) ($\Delta\delta_{PP}$) pada titik dimana gaya F terjadi, dan pada saat yang sama COD ($\Delta\delta_{PM}$) akibat M bersama dengan deformasi sudut ($\Delta\phi_{MM}$) dapat ditulis :

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{FM} + \Delta\delta_{FF} = \lambda_{FM} M - \lambda_{FF} F \quad (1a)$$

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{MM} + \Delta\phi_{MF} = \lambda_{MM} M - \lambda_{MF} F \quad (1b)$$

Faktor λ_{FM} , λ_{FF} , λ_{MM} , dan λ_{MF} dapat diturunkan dari metode energi yang berhubungan dengan momen M yang bekerja secara simultan dengan gaya F.

$$\lambda_{MM} = \frac{2}{h^2 b E} \int_0^\xi Y_M^2(\xi) d\xi \quad (2)$$

$$\lambda_{FF} = \frac{2}{b E} \int_{c/h}^\xi Y_F^2(c/h, \xi) d\xi \quad (3)$$

$$\lambda_{FM} = \lambda_{MF} = \frac{2}{h b E} \int_{c/h}^\xi Y_M(\xi) Y_F(c/h, \xi) d\xi \quad (4)$$

Bila diskontinuitas perpindahan dalam retak penampang melintang pada level tulangan, dianggap nol maka

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{FM} + \Delta\delta_{FF} = \lambda_{FM} M - \lambda_{FF} F = 0 \quad (5)$$

didapatkan *unknown* gaya F fungsi M yaitu

¹⁾ Ir. Agoes Soehardjono MD, MT., Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil, FT – Unibraw Malang
Mahasiswa Program Doktor Jurusan Teknik Sipil FTSP PPS – ITS Surabaya

²⁾ Prof. Dr. Ir. IGP Raka, Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil FTSP – ITS Surabaya

³⁾ Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS, Ph.D., Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil FTSP – ITS Surabaya

$$\frac{F \cdot h}{M} = \frac{1}{r''(c/h, \xi)} \quad (6)$$

$$K_{IF} = - \frac{Y_F(\xi)}{h^{1/2}b} F_s \quad (9)$$

dengan :

$$r''(c/h, \xi) = \frac{\int_{c/h}^{\xi} Y_P^2(c/h, \xi) \cdot d\xi}{\int_{c/h}^{\xi} Y_M(\xi) \cdot Y_P(c/h, \xi) \cdot d\xi} = \frac{\lambda_{FF}}{\lambda_{FM} \cdot h} \quad (7)$$

dengan $\xi = a/h$ adalah tinggi retak relatif. Untuk $\xi \leq 0,6$, maka Y_M dan Y_F adalah

$$Y_M(\xi) = 6 (1,99 \xi^{1/2} - 2,47 \xi^{3/2} + 12,97 \xi^{5/2} - 3,17 \xi^{7/2} + 24,80 \xi^{9/2}) \quad (10)$$

$$Y_F(\xi) = 1,99 \xi^{1/2} - 0,41 \xi^{3/2} + 18,70 \xi^{5/2} - 38,48 \xi^{7/2} + 53,85 \xi^{9/2} \quad (11)$$

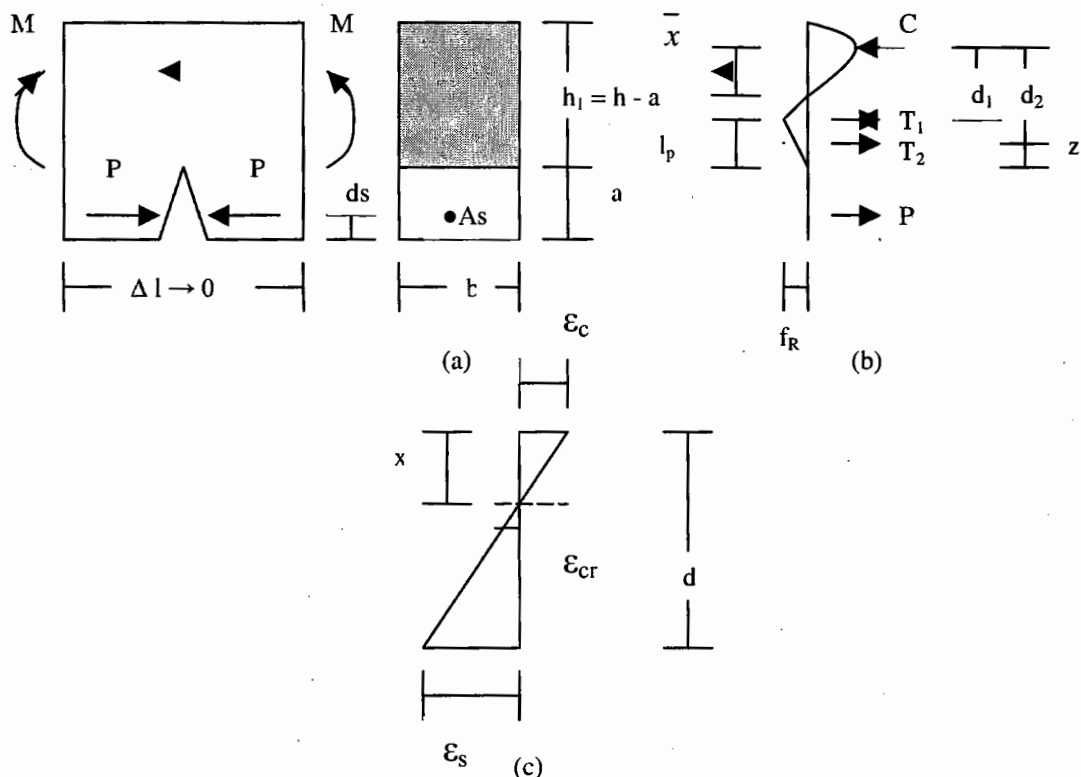
Konsep momen retak (*fracture moment*) M_F paralel dengan konsep asli dari M_F yang dikembangkan oleh Carpinteri (1992). Dengan mengacu pada elemen balok beton bertulang pada mode I melalui retak tepi, elemen tersebut mengalami momen lentur M dan gaya eksentris tulangan F_s (Gambar.1).

Transfer gaya tulangan eksentris F_s , yang konsentris dengan sumbu balok, komponen faktor intensitas tegangan (*stress intensity factors*) K_{IM} , K_{IF} akibat aksi momen dan gaya aksial, dapat ditulis :

$$K_{IM} = \frac{Y_M(\xi)}{h^{3/2}b} [M - F_s (\frac{h}{2} - ds)] \quad (8)$$

Kontribusi gaya tulangan untuk K_{IF} dan K_{IM} adalah (-) dari tulangan ke ujung retak. Superposisi komponen intensitas tegangan K_{IF} , K_{IM} , dan seting $K_I = K_{IC}$, didapat

$$M_F = \frac{K_{IC} h^{3/2} b}{Y_M(\xi)} + \frac{F_s h}{Y_M(\xi)} [Y_F(\xi) + Y_M(\xi) (\frac{1}{2} - \frac{ds}{h})] \quad (12)$$



Gambar. 1. Elemen Balok dan Variasi Regangan dan Tegangan pada Tinggi Balok
Sumber : A. Carpinteri, 1992

$$M_F = \frac{1}{\alpha} K_{IC} + \frac{\beta}{\alpha} F_s \quad (13)$$

dengan :

$$\alpha = Y_M(\xi) / (h^{3/2} b) \quad (14)$$

$$\beta = [Y_M(\xi) / (h^{3/2} b)] \left(\frac{h}{2} - d_s \right) + \frac{Y_F(\xi)}{(h^{1/2} b)} \quad (15)$$

$$K_{IC} = 2,175 f_c^{0,6} \sqrt{\gamma} \text{ (N/mm}^{3/2}\text{)} \quad (16)$$

$$\gamma = 2,828 e^{0,0454 d_{max}} \quad (17)$$

Dengan asumsi bahwa variasi regangan sepanjang tinggi penampang balok akan linier mengikuti hipotesis Euler-Bernoulli, dan variasi tegangan sepanjang tinggi penampang balok konsisten dengan variasi regangan, maka distribusi tegangan tekan beton diasumsi dalam bentuk Madrid Parabola ($C = k_1 k_3 b \times f_c'$).

Filosofi dasar yang melatar belakangi asumsi ini adalah bahwa tegangan disekitar ujung retak \leq modulus runtuh f_R , dimana ada redistribusi akibat pelunakan. Model sederhana, bekerja dari $f_c' = 0$ ke tegangan f_R menggunakan garis lurus sebagai pendekatan.

Dengan melihat distribusi tegangan, untuk komponen resultan tegangan tarik adalah

$$T_1 = \frac{1}{2} f_R (h_1 - x - l_p) b \quad (18)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} f_R l_p b \quad (19)$$

terhadap pusat blok tegangan tekan beton, maka momen keseimbangan, M_{eq} adalah

$$M_{eq} = T_1 d_1 + T_2 d_2 + F_s d_3 \quad (20)$$

dengan :

$$d_1 = \frac{2}{3} (h_1 - x - l_p) + \bar{x} \quad (21)$$

$$d_2 = (h_1 - x - \frac{2}{3} l_p) + \bar{x} \quad (22)$$

$$d_3 = d - x + \bar{x} \quad (23)$$

$$l_p = (h_1 - x) - \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_s} (d - x) \quad (24)$$

Pada kondisi pra leleh ($\epsilon_s < \epsilon_y$), perambatan retak (*crack propagation*) akan terjadi bila momen retak sama dengan momen keseimbangan ($M_F = M_{eq}$).

PENGARUH RASIO BEBAN PADA BEBAN BERULANG

Bila $M_{eq} = M_F$ maka terjadi perambatan retak. Laju perambatan retak di daerah B tidak hanya fungsi f_s dan ukuran retak a (faktor intensitas tegangan $K = Y f_s \sqrt{\pi a}$) tetapi juga variabel rasio beban R . Secara

matematik, dinyatakan dalam pers. Paris-Erdogan (1963) yaitu :

$$\partial a / \partial N = C (\Delta K, R)^m \quad (25)$$

Perambatan retak lelah (*fatigue crack growth*) beton menurut Baluch, Qureshy dan Azad (1989) pada baja U-39 ($f_y = 390 \text{ N/mm}^2$) menurut Stanley T. Rolfe dan John M. Barsom (1977) secara eksperimen adalah:

$$\partial a / \partial N = 7,39E-05 \Delta K^{1,25} \text{ (mm cycle}^{-1}\text{)} - (N \text{ mm}^{-3/2}) \quad (26)$$

$$\partial a / \partial N = 2,03E-13 \Delta K^{3,02} \text{ (mm cycle}^{-1}\text{)} - (N \text{ mm}^{-3/2}) \quad (27)$$

Rumusan modulus elastisitas beton bertulang $E = 0,1255 E_s$. Selang faktor intensitas tegangan suatu material berbanding lurus dengan modulus elastisitasnya, maka $\Delta K = 0,1255 \Delta K_s$, sehingga laju perambatan retak lelah beton bertulang menjadi :

$$\partial a / \partial N = 3,83E-16 \Delta K^{3,02} \text{ (mm cycle}^{-1}\text{)} - (N \text{ mm}^{-3/2}) \quad (28)$$

Suatu model perambatan retak dipakai untuk kasus rasio beban $R = P_{min} / P_{max} = K_{min} / K_{max} \approx 0$, pada intensitas tegangan rendah ($f_s/f_y = 0,15$) dan menengah ($f_s/f_y = 0,5$). Dalam daerah A dan C adalah sensitif terhadap struktur mikro dari material. Pengaruh R pada daerah B walau kurang sensitif tetapi selang faktor intensitas tegangannya (ΔK) cukup besar.

Konsep penutupan retak lelah digunakan untuk menghitung pengaruh rasio beban R . Pengukuran eksperimen terbaru dari penutupan retak menunjukkan bahwa beban yang menyebabkan retak terbuka, P_{op} ($= K_{IC}$), bukan nilai unik, tetapi tergantung teknik pengukuran. Sejumlah peneliti telah menyelidiki pengaruh R di daerah dekat *threshold*. Hasilnya menunjukkan bahwa ΔK_{th} cenderung menurun seiring meningkatnya R , tetapi pada $R > 0,5$, sensitivitasnya relatif kecil.

Menurut studi Elber (1971), faktor intensitas tegangan efektif, ΔK_{eff} , digunakan untuk menentukan korelasi perambatan retak pada beban berulang yang berbeda dalam daerah B. Bentuk umum dari tipe hubungan ini adalah :

$$\frac{\partial a}{\partial N} = C (U \Delta K)^m, \quad (29)$$

dengan :

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{(1 - \frac{K_{IC}}{f_s})}{(1 - R)} \quad (30)$$

ANALISIS LEBAR RETAK PADA BEBAN BERULANG

Komponen (*compliance*) pada $c/h = 0,15$ dapat didekati dengan

$$\lambda_{FF} = \frac{2}{bE} 4,524 e^{2,687 \xi} \quad (31)$$

$$\lambda_{FM} = \lambda_{MF} = \frac{2}{hbE} 57,366 \xi^{1,7622} \quad (32)$$

Gaya $F = A_s f_s$ bernilai (-) karena menyebabkan retak dan modulus elastisitas beton bertulang $E = 4230 (n\rho + 1) \sqrt{f_c'}$. Masukkan pers. (31) dan (32) ke pers. (1) sehingga rumusan lebar retak maksimum menjadi

$$w_{maks} = 4278.10^{-6} \frac{A_s f_s}{s.(1+n.\rho).\sqrt{f_c'}} e^{2,687 \xi} \text{ (mm)} \quad (33)$$

dengan :

- A_s = luas 1 tulangan (mm^2)
- s = jarak tulangan (mm)
- f_s = tegangan baja saat retak (N/mm^2)
- n = E_s / E_c = angka ekivalen
- f_c' = tegangan beton tekan (N/mm^2)
- ρ = A_s / sh = angka tulangan

Berdasarkan data (Tabel.1) dan perhitungan laju perambatan retak lelah (*fatigue crack growth rate analysis*) (Tabel.2) pada kondisi siklus beban ($N = 10^6$) dapat disusun hubungan $\xi = f(f_s, R)$ atau $\xi = f(R)$ pada variasi f_s/f_y (Grafik.1). Selanjutnya masukkan ke pers. (33) sehingga didapat hubungan $w_{maks} = f(f_s, R)$ atau $w_{maks} = f(R)$ pada variasi f_s/f_y (Grafik.2).

Dari analisis di atas dapat dilihat bahwa untuk siklus beban $N = 10^6$, pada rasio tegangan $f_s/f_y = 0,5$ dan rasio beban $R \geq 0,5$ memberi kontribusi secara signifikan terhadap tinggi retak relatif (ξ) (Grafik.1), sedangkan pada lebar retak (w_{maks}) relatif kecil (Grafik.2), seperti dalam hubungan berikut ini :

$$w_{maks\ 0,15} = 6 \text{ E-}17 R + 0,0492$$

$$w_{maks\ 0,20} = 6 \text{ E-}06 R + 0,0658$$

$$w_{maks\ 0,30} = 0,0001 R + 0,0987$$

$$w_{maks\ 0,40} = 0,0006 R + 0,1316$$

$$w_{maks\ 0,50} = 0,0039 R + 0,1641$$

$$w_{maks\ 0,60} = 0,0071 R + 0,1969$$

Tabel.1. Data Struktur Pelat Bertulangan Tunggal

Keterangan	Notasi	Satuan	Pelat
Mutu baja	f_y	N/mm^2	390
Mutu beton	f_c	N/mm^2	35
Modulus runtuh	f_r	N/mm^2	4,14
Modulus elastisitas baja	E_s	N/mm^2	210000
Modulus elastisitas beton	E_c	N/mm^2	25025
Angka ekivalen	n		8,39
Jarak tulangan	s	mm	235
Tinggi	h	mm	200
Diameter tulangan	db	mm	19
Selimit beton	c	mm	20,5
Luas tulangan	A_s	mm^2	283,6
Angka tulangan	ρ		0,0081
Ketangguhan retakan	K_{IC}	$\text{N/mm}^{3/2}$	48,62

Tabel.2. Perhitungan Laju Perambatan Retak Lelah

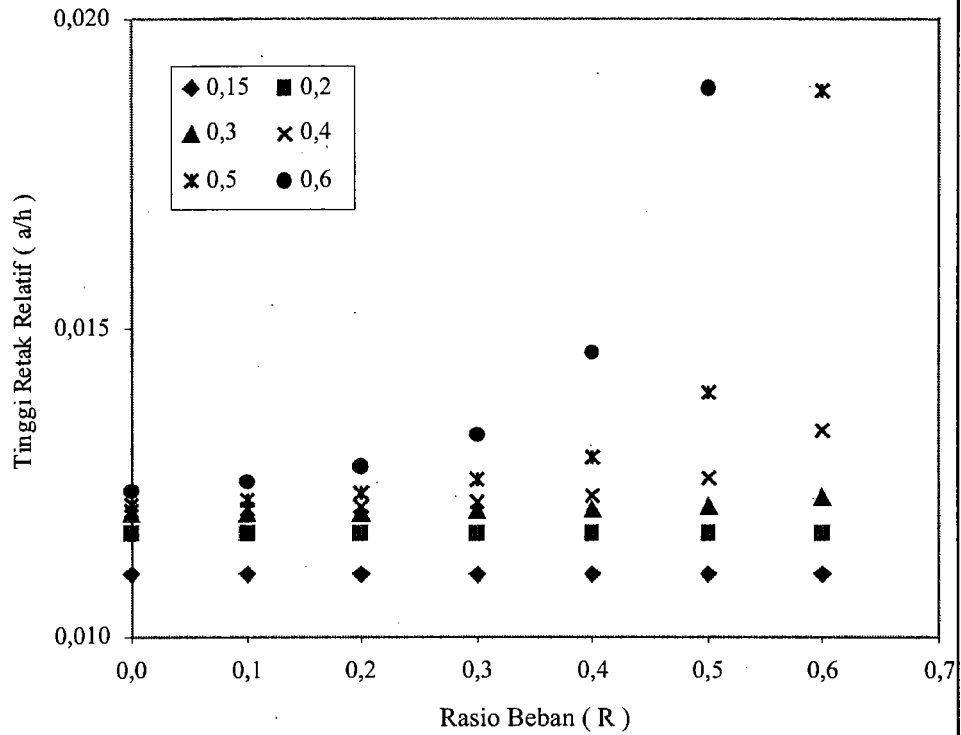
Untuk $f_s = 234 \text{ N/mm}^2$ ($f_s / f_y = 0,6$) ; $R = 0,5$; $h = 200 \text{ mm}$

$$Y_M(\xi) = 6 (1,99\xi^{1/2} - 2,47\xi^{3/2} + 12,97\xi^{5/2} - 23,17\xi^{7/2} + 24,80\xi^{9/2}) ; \Delta K = Y_M f_s \sqrt{\pi a_{ave}}$$

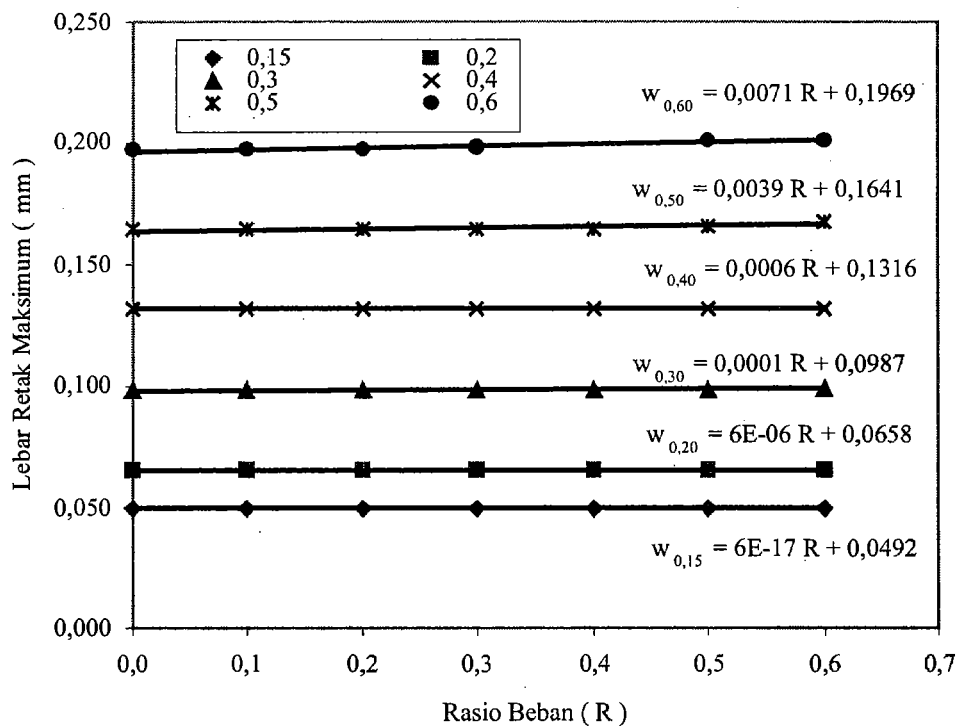
$$da / dN = 3,83 \text{ E-}16 \Delta K_1^{3,02} ; K_{IC} = 48,62 \text{ N mm}^{-3/2}$$

a mm	Δa mm	a_{ave} mm	$Y_M(\xi)$ mm	ΔK_1 $\text{N/mm}^{3/2}$	da/dN mm/cycle	ΔN cycles	$N=N+\Delta N$ cycles	$\xi =$ a/h
2,40							0	0,01198
2,40	0,00	2,40	1,29	827	9,95E-07	1,00E+00	1,00E+00	0,01198
2,40	0,00	2,40	1,29	827	9,95E-07	9,00E+00	1,00E+01	0,01198
2,40	0,00	2,40	1,29	827	9,95E-07	9,00E+01	1,00E+02	0,01198
2,40	0,00	2,40	1,29	827	9,95E-07	9,00E+02	1,00E+03	0,01198
2,41	0,01	2,40	1,29	829	1,00E-06	9,00E+03	1,00E+04	0,01200
2,50	0,10	2,45	1,30	847	1,07E-06	9,00E+04	1,00E+05	0,01227
5,05	2,55	3,78	1,61	1295	3,85E-06	6,63E+05	762.573	0,01889

Grafik.1. Tinggi Retak Relatif vs. Rasio Beban ($N = 10^6$)



Grafik.2. Lebar Retak Maksimum vs. Rasio Beban ($N = 10^6$)



KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

- Pada kondisi siklus beban $N = 10^6$ dan rasio tegangan $f_s/f_y = 0,6$ maka pengaruh rasio beban $R = 0,5$ terhadap tinggi retak relatif (ξ) adalah 153 % dibandingkan pada $R = 0,0$.
- Pengaruh rasio beban $R = 0,5$ terhadap lebar retak maksimum (w_{maks}) adalah 2 % dibandingkan pada $R = 0,0$. Jadi pengaruh rasio beban terhadap w_{maks} kurang signifikan.

Saran

- Studi parameter lainnya perlu dilakukan seperti siklus beban (N), frekuensi pengukuran (f) dan cuaca.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tulisan ini ditulis atas bimbingan bapak Prof. Dr. Ir. IGP Raka (promotor) dan Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS, Ph.D. (co promotor) dari Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS.

DAFTAR PUSTAKA

- Bazant ZP, Planas J, 1998, *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC. Press, New York.
- Broek D, 1989, *The Practical Use of Fracture Mechanics*, 2nd Editions, Kluwer Academic Publishers, London.
- Callister WD, Jr., 1997, *Materials Science and Engineering An Introduction*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Carpinteri A, 1992, *Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete*, Elsevier Applied Science, New York.
- Ellyin F, 1997, *Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction*, Chapman & Hall, New York.
- Gibson RF, 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, International Editions, Mc Graw-Hill, Inc, New York.
- Rolfe ST, Barsom JM, 1977, *Fracture and fatigue Control in Structures Applications of Fracture Mechanics*, Prentice -Hall Inc, New Jersey.